

Sonnenenergie-Kraftwerke mit Gasturbinen

Bammert, Karl

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 28, 1977,
S.125-130



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Sonnenenergie-Kraftwerke mit Gasturbinen*)

Von *Karl Bammert*, Hannover

Zusammenfassung

Die speziellen Eigenschaften der geschlossenen Gasturbine qualifizieren sie für eine große Zahl unterschiedlicher Anwendungsfälle. Arbeitsmittel, eingesetzte Primärenergie und Standort sind frei wählbar. Mit entsprechender Auslegung kann sie in einem Leistungsbereich von 500 kW bis zu 1000 MW und mehr mit hohen Wirkungsgraden eingesetzt werden. Sie ist besonders für die solare Stromerzeugung geeignet, zumal wegen der leicht realisierbaren Trockenkühlung auf Kühlwasser verzichtet werden kann. Im Gegensatz zu Dampfturbinen besitzen Gasturbinen große Entwicklungspotentiale, da mit fortschreitender Werkstofftechnologie immer höhere Turbineneintrittstemperaturen und damit höhere Anlagenwirkungsgrade erreicht werden können.

Summary

Because of its characteristics the closed-cycle gas turbine is suitable for a variety of applications. There is a free choice as to working medium, primary energy and location of the plant. With an appropriate layout it can be used with good efficiency in a capacity range of between 500 kW and 1000 MW and above. This means that it is ideal for use in solar energy plants, particularly in view of the fact that cooling water can be dispensed with because dry cooling is easily realisable. Furthermore there is an enormous development potential of the gas turbine as compared with steam turbine plants, since with progressive materials higher turbine inlet temperatures and thus higher plant efficiencies can be achieved.

1. Die Sonne als Primärenergieträger

Selbst bei konstantem Energieverbrauch der industrialisierten Staaten werden die wichtigsten Primärenergieträger in absehbarer Zeit verbraucht sein. Diese Situation wird verschärft durch den Nachholbedarf der Länder der Dritten Welt. Deshalb müssen rechtzeitig neue Lösungen entwickelt werden, um die wachsende Weltbevölkerung gesichert mit Energie versorgen zu können und die Reserven der besonders als Rohstoffe benötigten fossilen Primärenergieträger so weit wie möglich zu schonen. In immer stärkerem Maße sind dabei künftig ökologische Aspekte zu berücksichtigen.

Eine nach menschlichen Maßstäben unerschöpfliche Energiequelle ist unsere Sonne. Die Nutzung ihres Energiepotentials ist in höchstem Maße umweltfreundlich. Es werden keinerlei Schadstoffe emittiert und auch der globale Wärmehaushalt

*) Auszugsweise vorgetragen am 22. 9. 1977 auf der Weltenergiekonferenz in Istanbul.

bleibt unbeeinflusst. Aber auch hier bestimmen letztlich wirtschaftliche Überlegungen, ob, wann und wo sich Sonnenenergieanlagen durchsetzen können. Eine wichtige Einflußgröße ist dabei der Wirkungsgrad, mit dem die einfallende Sonnenstrahlung z. B. in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Hohe Wirkungsgrade werden erreicht, wenn man hohe obere Prozeßtemperaturen verwirklichen und in der Wärmekraftmaschine auch ausnutzen kann. Durch entsprechend angeordnete Spiegel lassen sich mit Hilfe der Sonnenenergie außerordentlich hohe Temperaturen erzielen. Bei thermodynamischen Prozessen ist die obere Prozeßtemperatur aus werkstofftechnologischen Gründen auf Werte von zur Zeit 800 bis 900° C beschränkt. Diese Temperaturen lassen sich nach dem Stand der Technik nur mit Gasturbinenkreisläufen ausnutzen.

2. Möglichkeiten der Gasturbine zur Lösung der Energieprobleme

Die geschlossene Gasturbine ist ein Energieumwandlungssystem, das in Auslegung, Konstruktion und Betrieb sicher beherrscht wird. In der Bundesrepublik haben fünf Anlagen mit Luft als Arbeitsmittel bereits eine Betriebszeit von mehr als 100 000 h erreicht (1). Mit der Heliumturbine Oberhausen werden Erfahrungen beim Betrieb derartiger Anlagen mit Helium als Arbeitsmittel gewonnen (2). Als Primärenergie werden bei diesen Anlagen Gichtgas, Kohle, Öl, Gas und auch Mischungen eingesetzt (3). Auch nukleare Brennstoffe sind für im geschlossenen Kreislauf arbeitende Gasturbinen vorgesehen. Dabei soll ein mit Helium gekühlter Hochtemperaturreaktor mit einer Heliumturbine im direkten Kreislauf gekoppelt werden (4).

Da sowohl Arbeitsmittel als auch Primärenergie frei wählbar sind, ist die geschlossene Gasturbine vielseitig einsetzbar. Es können auch Abwärme aus technischen Prozessen und Sonnenenergie als Energiequellen verwendet werden. Da tiefe untere Prozeßtemperaturen den Wirkungsgrad verbessern, eignet sich die geschlossene Gasturbine auch zur Vergasung von LNG (Liquified Natural Gas). Dabei ist die Abwärme des Gasturbinenprozesses die Wärmequelle für die Vergasung. Das weite Spektrum der Einsatzmöglichkeiten reicht von kleinsten Leistungen bis hin zu Werten von 1000 MW und mehr.

Im Gegensatz zur Dampfturbine, deren technische Entwicklung weitgehend als abgeschlossen betrachtet werden kann, hat die Gasturbine noch ein großes Entwicklungspotential: mit fortschreitender Werkstofftechnologie sind höhere Turbineneintrittstemperaturen und damit zugleich noch bessere Wirkungsgrade möglich.

Ein weiterer Vorteil der Gasturbine liegt in der Wärmeabfuhr. Während bei Dampfturbinenanlagen die gesamte Abwärme bei der jeweiligen Kondensationstemperatur (ca. 20—40° C) nutzlos an die Umgebung abgeführt wird, fällt sie bei der geschlossenen Gasturbine auf einem Temperaturniveau an, das eine weitere Verwendung der Abwärme ermöglicht. Als Beispiele seien genannt: Fernheizung, Klimatisierung, Prozeßwärme und der sog. Bottom-Cycle, bei dem die Abwärme des Prozesses als Wärmequelle z. B. für einen Ammoniak-Kreislauf genutzt wird, der

seinerseits elektrische Energie erzeugt. Dabei erhält man, unabhängig von der Abwärmenutzung, gleichbleibend hohe Wirkungsgrade für die Stromerzeugung. Beim heutigen Stand der Technik kann die vom Arbeitsmittel aufgenommene Wärme zu mehr als 40 % in elektrische Energie umgewandelt werden. Bei gleichzeitiger Verwertung der Abwärme kann die zugeführte Energie bis zu 80 % und mehr ausgenutzt werden.

Wegen der hohen mittleren Temperatur der Abwärme ist auch eine trockene Luftkühlung leicht und kostengünstig durchführbar. Damit sind geschlossene Gasturbinen nahezu standortunabhängig. Das prädestiniert sie besonders für die solare Stromerzeugung in sonnenreichen Ländern, in denen oftmals auch Kühlwasser knapp ist.

3. Die Gasturbine in Sonnenenergieanlagen

Für Sonnenenergieanlagen kommt ein weiter Leistungsbereich und damit verbunden eine Vielzahl von möglichen Einsatzbedingungen in Betracht, beginnend bei Leistungen von 500 kW bis 1 MW zur Versorgung von isolierten Ortschaften etc. im Inselbetrieb bis hin zu 100 MW-Anlagen und darüber, die in ein Verbundnetz einspeisen. Im folgenden soll nun gezeigt werden, daß mit einer Gasturbine als Wärmekraftmaschine nahezu alle denkbaren Anforderungen an Sonnenenergieanlagen erfüllt werden können.

Bild 1 veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau einer Solarenergieanlage mit geschlossener Gasturbine; dabei wurde die einfachste Gestaltung des Kreislaufs zugrundegelegt. Der Verdichter a komprimiert das Arbeitsmittel auf den höchsten Prozeßdruck. Anschließend nimmt das Hochdruckgas im rekuperativen Wärmeaustauscher b einen Teil der im Turbinenabgas (Niederdruckgas) noch enthaltenen Wärme auf. Das Hochdruckgas, das dann die Röhrenbündel des Receivers c durchströmt und die Wärme der dort konzentrierten Sonnenstrahlung aufnimmt, wird auf die höchste Prozeßtemperatur erhitzt und in der Turbine d entspannt. Mit e ist die Wärmesenke des Prozesses bezeichnet. Der Block f stellt eine Hilfswärmequelle oder ein Speichersystem dar, um auch bei fehlender Sonneneinstrahlung die Anlage noch für einige Zeit betreiben zu können. Die Umschaltung zwischen Gasreceiver c und Wärmespeicher f kann mit dem Dreiwegeventil g durchgeführt werden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage sollte auch tagsüber die überschüssige Sonnenenergie im Speicher f aufgenommen werden. Dies geschieht durch das Dreiwegeventil g'. Zur Regelung der Turbineneintrittstemperatur ist noch ein Temperaturregelventil h vorzusehen, das wie im Bild angeordnet sein kann. So kann durch Zumischen kälteren Gases die Turbineneintrittstemperatur unter die Receiveraustrittstemperatur gebracht werden. Je nach Zweck und Größe der Anlage sind, ausgehend von diesem Prinzipschema, verschiedene Ausgestaltungen des Kreislaufs möglich.

Für kleine Anlagen an abgelegenen Standorten, die aus Gründen fehlender Infrastruktur möglichst einfach aufgebaut sein sollten, wird man Luft als Arbeitsmittel wählen und den oberen Prozeßdruck so festlegen, daß Umgebungsluft verwendet werden kann. Dadurch ist kein spezieller Kühler erforderlich und die Anlage arbeitet

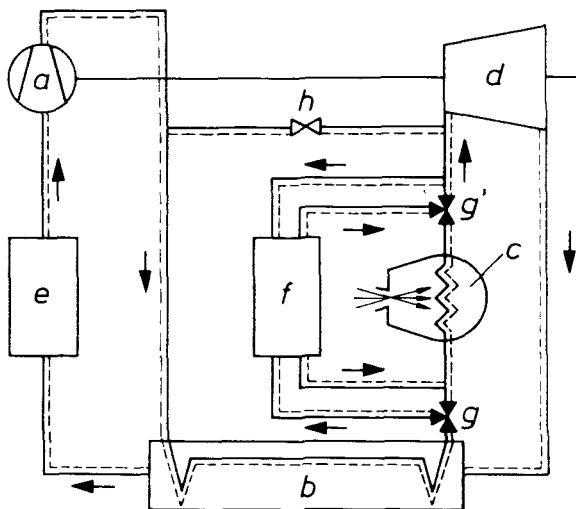


Bild 1

Bild 1: Schema eines Sonnenenergie-Kraftwerkes mit Gasturbine
 a Verdichter b Wärmetauscher c Receiver d Turbine e Kühler f Wärmespeicher
 g, g' Ventile h Regelventile

im offenen Kreislauf, obwohl sie wesentliche Merkmale einer geschlossenen Gasturbine aufweist. Durch diese Anordnung ergibt sich als weiterer Vorteil, daß man in einer zusätzlichen Brennkammer fossilen Brennstoff unmittelbar verbrennen und die Turbine mit Rauchgas beaufschlagen kann. Das bedeutet, daß die Leistung der Anlage auch bei fehlender Sonneneinstrahlung und bei aufgebrauchter Wärmekapazität des Speichers verfügbar ist.

Durch Hinzufügen eines Kühlers kann der Kreislauf geschlossen und der obere Prozeßdruck frei gewählt werden. Hebt man nun das Druckniveau im Kreislauf z. B. um den Faktor 10 an, so erhält man mit nahezu baugleichen Kreislaufkomponenten die zehnfache Anlagenleistung. Dadurch lassen sich Entwicklungskosten einsparen. Die Klemmenwirkungsgrade derartiger Anlagen dürften bei etwa 28% liegen. Dabei ist der Klemmenwirkungsgrad definiert als das Verhältnis der Leistung an den Klemmen des Generators und der im Gasreceiver vom Arbeitsmittel aufgenommenen Wärmemenge, die noch etwa 50% der von der Sonne eingestrahltene Energie ausmacht. Etwa 40% der auf der Erdoberfläche eintreffenden Sonnenenergie gehen im Spiegelfeld und etwa 10% im Receiver verloren.

Bei größeren Anlagen läßt sich der Wirkungsgrad verbessern, indem die Verdichtungsarbeit auf zwei Verdichter verteilt und eine Zwischenkühlung vorgesehen wird. Hinzu kommt, daß die Turbomaschinen bei größeren Durchsätzen mit besseren Wirkungsgraden gebaut werden können. Bei Anlagen mit Luft als Arbeitsmittel erscheinen im Leistungsbereich um 20 MW Klemmenwirkungsgrade von 39 bis 40 % erreichbar.

Steigt die Anlagenleistung noch weiter, so sollte man Helium als Arbeitsmittel wählen. Dies hat den Vorteil, daß die wärmeaustauschenden Apparate — gegenüber Luftanlagen gleicher Leistung — wegen des besseren Wärmeübergangs bei Helium verkleinert werden können. Insgesamt kompliziert Helium jedoch den Anlagenaufbau, so daß qualifiziertes Personal notwendig ist. Hier sind dann Klemmenwirkungsgrade von 40 bis 45 % möglich.

Während sonnenarmer Zeiten ist beim geschlossenen Kreislauf die Verwendung fossiler Brennstoffe mit höheren Kosten verbunden, da ein zusätzlicher Erhitzer erforderlich wird. Daher wird daran gedacht, einen Speicher zu entwickeln, der die solare Wärme für einen Zeitraum von ca. sechs Stunden vorhalten kann.

Vergleicht man die Sonnenenergieanlage mit geschlossener Gasturbine mit einer zur Zeit ebenfalls untersuchten Zweikreisanlage, bei der Natrium durch Sonneneinstrahlung erhitzt wird und seine Wärme an einen nachgeschalteten Dampfturbinenkreislauf abgibt, so stellt man fest, daß die Gasturbinenanlagen nicht nur die genannten Vorteile besitzen, sondern auch wesentlich einfacher aufgebaut sind. Sie können zudem in kurzer Zeit angefahren werden und nutzen die jahres- sowie tageszeitlich unterschiedlich eingestrahltten Energiemengen — bei Verwendung der Druckregelung — mit nahezu konstantem Wirkungsgrad aus.

4. Die solare Stromerzeugung aus der Sicht der Entwicklungsländer

Die Elektrifizierung der Entwicklungsländer kann sinnvollerweise nur in kleinen Schritten vor sich gehen. Für moderne Kraftwerke fehlt nicht nur das Kapital, sondern besonders auch qualifiziertes Personal, um die Anlagen fachmännisch zu betreiben und zu warten. Hohe Abnehmerdichte und ausreichende Leitungssysteme, als Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz großer Kraftwerksblöcke, sind meist ebenso wenig vorhanden, wie Devisen und Infrastruktureinrichtungen für den Erwerb und Transport der benötigten Brennstoffe. Stromerzeugungsanlagen für Entwicklungsländer sollten deshalb einfach, robust und zuverlässig sein. Gasturbinenanlagen mit Nutzung der Sonnenenergie erfüllen diese Bedingungen. Die vielfältigen, für uns bereits selbstverständlichen Anwendungsmöglichkeiten des elektrischen Stromes (kochen, kühlen und gefrieren, beleuchten, bewässern etc.) könnten mit den beschriebenen Anlagen auch diesen Ländern leicht zugänglich gemacht werden.

Dank: Meinen Mitarbeitern, den Herren Dipl.-Ing. R. Krapp und U. Reiter, danke ich für die Unterstützung bei den umfangreichen numerischen Kreislaufberechnungen.

5. Literatur

- (1) Bammert, K.: A General Review of Closed-Cycle Gas Turbines Using Fossil, Nuclear and Solar Energy. Pocket edition No. 57, Published by Karl Thiemig, Munich 1975.
- (2) Bammert, K. and G. Deuster: Operating Experiences with the Oberhausen Helium Turbine Plant. Paper presented at the 22nd International Gas Turbine Conference of the American Society of Mechanical Engineers, Philadelphia, Pennsylvania, USA, March 28, 1977.
- (3) Bammert, K. and G. Groschup: Status Report on Closed-Cycle Power Plants in the Federal Republic of Germany. Transactions of the ASME, Vol. 99, (1977), No. 1, pp 37/46.
- (4) Bammert, K., G. Deuster and J. Rurik: A Pilot Plant for Large Scale Helium Turbines with High Temperature Reactors. Ninth World Energy Conference, September 22—27, 1974, Detroit/USA. Transactions, Division IV — Energy Conversion, Vol. IX, pp. 398/404.